

Konzeption und Analyse zur Überwachung der Spannungsqualität in Verteilnetzen

Stefan ARTHOFER⁽¹⁾, Stefan WILKER⁽²⁾, Thilo SAUTER^(2,3)

⁽¹⁾ SIEMENS AG Österreich, Siemensstraße 90, 1210 Wien, Österreich
stefan.arthofer@siemens.com

⁽²⁾ TU Wien – Institut für Computertechnik, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich
thilo.sauter@tuwien.ac.at, stefan.wilker@tuwien.ac.at

⁽³⁾ Universität für Weiterbildung Krems, Department für integrierte Sensorsysteme, Viktor Kaplan Straße 2, 2700 Wr. Neustadt, Österreich

Kurzfassung:

Die Herausforderungen des Klimawandels erfordern einen grundlegenden Wandel im Betrieb der elektrischen Energienetze. Verteilungs- und Übertragungsnetzbetreiber werden durch die Integration dezentraler erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen wie Windkraft- und Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) vor zusätzliche Herausforderungen gestellt. Daher ist es notwendig, die Entwicklung des Netzmanagements voranzutreiben und das Monitoring zu verbessern, um diesen Herausforderungen zu begegnen. Diese Arbeit ist motiviert durch die Notwendigkeit einer zunehmenden Digitalisierung in elektrischen Verteilnetzen und durch den Mangel an Datenerfassung auf Niederspannungsebene. Es wird ein Konzept zur effizienten Überwachung der Netzqualität unter Verwendung verschiedener Aggregationsintervalle in realen Anwendungen entwickelt und evaluiert. Dieses Konzept kombiniert mehrere Netzqualitätsparameter zu einem einfachen KPI mittels kubischer Mittelung. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass Verteilnetzbetreiber die Spannungsqualität im gesamten Verteilnetz effizient überwachen können.

Keywords: Power Quality, Netzspannungsqualität, Verteilnetzmonitoring, Netzmanagement

1 Einleitung

Die Bedingungen des Betriebs von Verteilnetzen haben sich in den vergangenen Jahren maßgeblich verändert. Der zukünftige Betrieb von Verteilnetzen wird unter anderem durch den zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien in den Stromversorgungsnetzen bestimmt [1, 2]. Diese Arbeit verfolgt das Ziel, einen Beitrag zur Bewältigung der gegenwärtigen Herausforderungen zu leisten. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird der Frage nachgegangen, auf welche Art und Weise die Digitalisierung in elektrischen Verteilnetzen vorangebracht werden kann. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht hierbei die Eignung von verteilten Messgeräten wie dem Siemens SICAM Enhanced Grid Sensor (EGS), welche aggregierte Messungen an Netzknoten im Niederspannungsnetz durchführen, zur Bestimmung der Netzspannungsqualität und der Netzzustandsdaten [4]. Ein zentraler Aspekt dieser Arbeit ist die Untersuchung der Möglichkeiten zur Überwachung der Netzspannungsqualität in elektrischen Verteilnetzen. Ein weiterer Untersuchungsgegenstand ist die Bestimmung der Aggregationsintervalle für derartige Messungen.

Die vorliegende Arbeit wird durch den aktuellen Stand der Netzführung in Österreich motiviert, wie in Abbildung 1 nach [1] dargestellt. Es zeigt sich ein deutliches Gefälle im Ausbaugrad von der Hochspannungsebene über die Mittelspannungsebene bis zur Niederspannungsebene. Im Niederspannungsnetz gibt es nach [1] nahezu keine Automatisierung und kein Monitoring. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, das Monitoring in der Niederspannungsebene zu verbessern.

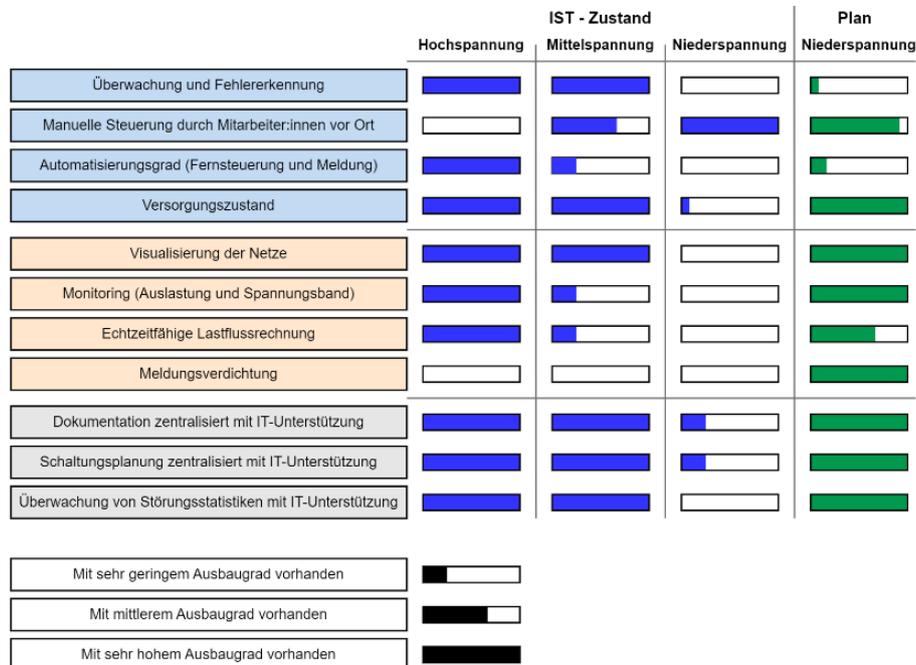


Abbildung 1: Aktueller Stand in der Netzführung in Österreich [vgl. 1]

Die Erreichung der Forschungsziele erfordert die Identifikation aktueller Problematiken hinsichtlich der Netzspannungsqualität und des Netzzustandes, welche die Versorgungsnetze betreffen. In der vorliegenden Untersuchung erfolgt zunächst ein Vergleich von zwei Messgeräten. Ziel ist die Darstellung der Vor- und Nachteile des kostengünstigeren SICAM EGS im Vergleich zum State-of-the-Art-Netzanalysator Siemens SICAM Q200 der Genauigkeitsklasse A nach DIN EN 61000-4-30. Der Vergleich basiert auf einer Kombination von theoretischen Überlegungen und Vergleichsmessungen, welche die Messgenauigkeit von Parametern wie Spannung, Frequenz, Strom, Leistung und Oberschwingungen der beiden Geräte ermitteln sollen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird im Anschluss ein umfassendes Konzept für eine effiziente Spannungsqualitätsüberwachung, welches in [3] präsentiert wird, erweitert und in Form von Messungen evaluiert. Die Messungen werden zunächst im Labor mit verschiedenen Aggregationsintervallen der Messwerte durchgeführt. In einem nächsten Schritt erfolgt eine Evaluierung des Gesamtkonzepts anhand von realen Messungen an unterschiedlichen Standorten. Die Messungen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit an einem Einfamilienhaus ohne PV-Anlage, an einem Einfamilienhaus mit PV-Anlage sowie auf dem Microgrid Campus der Siemens AG Österreich durchgeführt [4].

2 Theoretischer Hintergrund

Im Folgenden werden der theoretische Hintergrund der Netzspannungsqualität sowie vereinfachte Konzepte zur Überwachung präsentiert.

2.1 Grundlagen der Netzspannungsqualität

Der Begriff der Netzspannungsqualität bezeichnet die Abweichung der Spannung vom Idealzustand, der durch eine sinusförmige Welle mit konstanter Amplitude und Frequenz gekennzeichnet ist [8]. Für die Netzqualität existieren mehrere Normen, wobei im Rahmen dieser Arbeit insbesondere auf die EN 50160 und die DIN EN 61000-4-30 verwiesen wird. Die DIN EN 61000-4-30 [5] definiert Messverfahren für die Netzqualität in 50 Hz- und 60 Hz-Wechselstromnetzen, während die Norm EN 50160 [6] die wesentlichen Merkmale der Netzversorgungsspannung an den Netzübergabepunkten zu den Verbrauchern in öffentlichen Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetzen definiert.

Die Netzspannungsqualitätsparameter, die in der Norm EN 50160 definiert werden, sind in Abbildung 2 dargestellt. Diese sind wie folgt definiert [6]:

Anhaltende Phänomene

- **Netzfrequenz:** Die Netzfrequenz in Europa beträgt 50 Hz und muss bei Verteilnetzen mit synchronem Anschluss an ein übergeordnetes Netz unter Verwendung von 10 s-Werten im Laufe eines Jahres im Bereich von 47 bis 52 Hz gehalten werden.
- **Versorgungsspannungsänderungen:** Die Ermittlung der Änderungen der Versorgungsspannungen erfolgt auf der Grundlage von 10-Minuten-Mittelwerten im Bereich von 90 % bis 110 % der Nennspannung.
- **Schnelle Spannungsänderungen:** Spannungsschwankungen, die auch Flicker genannt werden, in der elektrischen Versorgungsspannung können die Lichtstärke von Lampen schwanken lassen.
- **Spannungsunsymmetrie:** Eine Unsymmetrie in der Versorgungsspannung wird durch unterschiedliche Effektivwerte der Spannungen zwischen den Leitern oder durch unterschiedliche Phasenwinkelunterschiede zwischen den Leiterspannungen in Reihe beschrieben.
- **Oberschwingungsspannungen:** Oberschwingungen sind definiert als ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung.
- **Zwischenharmonische Spannung:** Zwischenharmonische sind Oberschwingungen, deren Frequenz kein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz ist.

Spannungseignisse

- **Versorgungsspannungsunterbrechungen:** Spannungsunterbrechungen werden in der aktuellen Norm nicht behandelt, da es sich um statistische Werte handelt.
- **Spannungsüberhöhungen und Spannungseinbrüche:** Unter diesem Begriff versteht man ein vorübergehendes Absinken (unter 90 %) oder Ansteigen (über 110 %) des Effektivwertes der Netzspannung an einem bestimmten Messpunkt im Versorgungsnetz.
- **Transiente Überspannungen:** Transiente sind definiert als kurzzeitige, oszillierende oder nicht oszillierende Überspannungen mit einer Dauer von einigen Millisekunden.

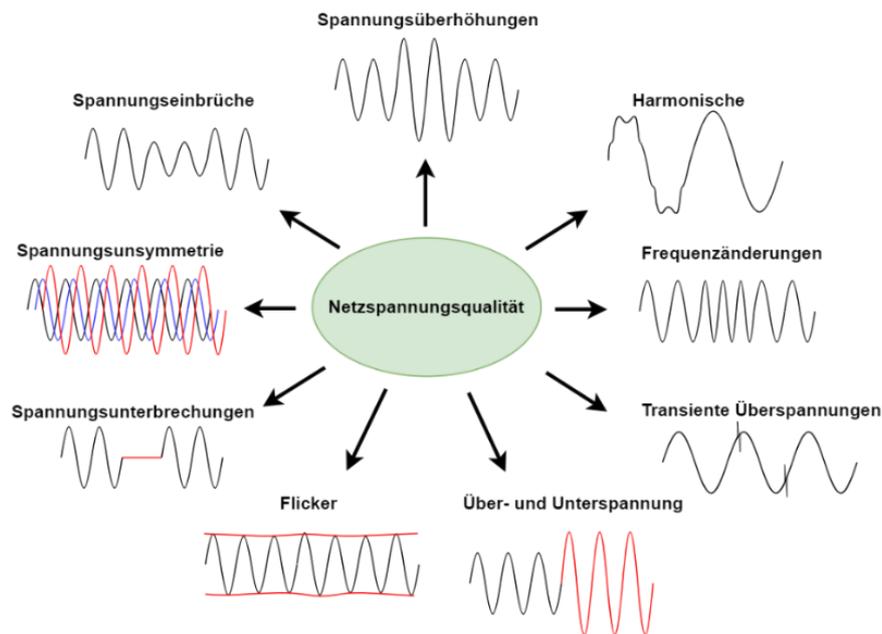


Abbildung 2: Netzqualitätsparameter nach EN 50160 [vgl. 15]

2.2 Überwachung der Netzspannungsqualität

Die Analyse der Ursachen für eine unzureichende Netzspannungsqualität erweist sich als eine Herausforderung, da diese sowohl beim Stromversorger als auch beim Verbraucher liegen kann. In bestimmten Fällen ist es notwendig, die Netzqualität zu messen, um die tatsächlichen Ursachen von Netzqualitätsproblemen zu ermitteln und effiziente Gegenmaßnahmen zu ergreifen [9]. Gemäß [10] lässt sich der Prozess der Netzqualitätsanalyse grundsätzlich in die Phasen der Erkennung, Klassifizierung, Charakterisierung und Lokalisierung von Netzqualitätsproblemen unterteilen. Die wichtigsten Ziele bei der Überwachung der Netzqualität sind demnach die Überprüfung der Einhaltung von Vorschriften, die Analyse der Leistung und die Fehlersuche. Im Rahmen des Überwachungsprozesses werden gemessene Netzqualitätsparameter mit festgelegten Grenzwerten verglichen [11].

Auf dem Markt gibt es eine Vielzahl von Messgeräten zur Messung der Netzqualität, die nach verschiedenen Kriterien unterschieden werden können. Dazu gehören die Mobilität, die Anzahl der gemessenen Spannungsphasen, die Genauigkeit des Gerätes und der Preis. In diesem Beitrag werden zwei verschiedene Messgeräte zur Bestimmung der Netzqualität betrachtet. Das erste Messgerät ist ein mobiles Spannungs- und Strommessgerät, der SICAM EGS. Dieses Gerät ist in der Lage, Spannung und Strom auf drei Phasen zu messen und darüber hinaus andere elektrische Größen wie Netzfrequenz, Leistung und Total Harmonic Distortion (THD) zu bestimmen [12]. Der SICAM EGS, der Rogowski-Spulen für die Strommessung verwendet, ist in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Produktbild des SICAM EGS [12]

Das zweite Messgerät in dieser Arbeit ist das hochpräzise Netzqualitätsmessgerät SICAM Q200, das ebenfalls zur Messung von Spannung und Strom auf 3 Phasen und zur Berechnung elektrischer Größen eingesetzt wird. Mit diesem Messgerät können auch Berichte nach der Norm EN 50160 [13] erstellt werden. Dieses wesentlich teurere Messgerät ist in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Produktbild des SICAM Q200 [13]

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die beiden Messgeräte zunächst theoretisch auf Netzparameter der Netzqualitätsnorm EN 50150 untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der Tabelle 1 dargestellt. Zusammengefasst zeigt sich, dass das SICAM Q200 alle Parameter gemäß der Norm wie gefordert bestimmen kann. Viele Parameter der Norm können auch mit dem kostengünstigeren SICAM EGS bestimmt werden. Flicker und transiente Überspannungen können derzeit nicht mit dem SICAM EGS gemessen werden. Oberschwingungen werden vom SICAM EGS bis zur 25. Harmonischen in Form der Oberschwingungsgesamtverzerrung bestimmt. Dies zeigt, dass der SICAM EGS grundsätzlich in einem breiten Bereich geeignet ist, die möglichen Parameter der Netzqualität zu bestimmen.

Netzspannungsqualitätsparameter	SICAM EGS	SICAM Q200
Spannungsüberhöhungen	+	+ DIN EN 61000-4-30
Spannungseinbrüche	+	+ DIN EN 61000-4-30
Harmonische	~	+ DIN EN 61000-4-30
Frequenzänderungen	+	+ DIN EN 61000-4-30
Transiente Überspannungen	-	+ DIN EN 61000-4-30
Über- und Unterspannung	+	+ DIN EN 61000-4-30
Flicker	-	+ DIN EN 61000-4-30
Spannungsunterbrechung	+	+ DIN EN 61000-4-30
Spannungsunsymmetrie	+	+ DIN EN 61000-4-30
Bedeutung der Zeichen		
Parameter kann von dem Messgerät grundsätzlich bestimmt werden.	+	
Parameter kann von dem Messgerät in geringerem Ausmaß bestimmt werden.	~	
Parameter kann von dem Messgerät nicht bestimmt werden.	-	
Parameter kann von dem Messgerät nach gültiger Norm bestimmt werden.		+ DIN EN 61000-4-30

Tabelle 1: Theoretischer Vergleich von SICAM EGS und SICAM Q200

2.3 Vereinfachte Konzepte zur Überwachung der Netzspannungsqualität

Im Rahmen der Konzeption zur simplen Überwachung der Spannungsqualität wurden zwei unterschiedliche Konzepte analysiert.

In [14] wird ein einfaches Konzept zur Überwachung der Netzqualität vorgestellt, das auf den Ampelfarben Rot (kritische Grenzwerte überschritten), Gelb (Warnung, weitere Überwachung erforderlich) und Grün (Netzqualität für den Betrieb geeignet) basiert. Heutzutage sind Energie- und Stromüberwachungssysteme und Messgeräte, die grundlegende Netzqualitätsmessungen wie THD-, Spannungspegel- oder Leistungsfaktormessungen durchführen, weit verbreitet. Diese Informationen werden jedoch in der Regel nicht genutzt, da die gelieferten Messungen oft komplex und nur für Energiequalitätsexpert:innen verständlich sind. Dieses Konzept klassifiziert die gemessenen Netzqualitätsparameter anhand von Ampelfarben mit dem Ziel, Benutzern ohne Fachkenntnisse die Überwachung der Netzqualität zu ermöglichen [14].

Die Norm EN 50160 legt Grenzwerte für Spannungen, Spannungsasymmetrie, Frequenz, Oberschwingungen und Flicker fest. Für jeden Grenzwert werden Ober- und Untergrenzen angegeben. Außerdem gibt es zwei Zeitreferenzen für Spannung und Frequenz. Die Idee für einen zusammengefassten Parameter nach [3] ist, den aktuellen Messwert als prozentuale Abweichung vom Grenzwert zu betrachten und diese Prozentwerte dann zusammenzufassen. Das bedeutet, dass es für jeden Grenzwert (Obergrenze, Untergrenze und jeweils einen Zeitbezug) eine relative Kenngröße gibt. Ein Parameter mit 100 % bedeutet, dass der Grenzwert voll ausgeschöpft ist. Ein Wert darüber bedeutet, dass bereits eine Überschreitung vorliegt. Für die Parameter gilt daher: Je niedriger der Parameter, desto besser die Netzqualität.

In [3] wird ein kubischer Mittelwert

$$kpq_{gesamt} = \sqrt[3]{\sum kpq_{parameter}^3}$$

für eine Zusammenfassung vorgeschlagen. Dies hat den Vorteil, dass der zusammengefasste Wert nur dann über 100 % liegt, wenn mindestens einer der Parameter über 100 % liegt. Dadurch ergibt sich ein einziger empfindlicher Parameter, der die aktuelle Netzqualität beschreibt. Wenn alle Werte unter 100 % liegen, werden alle Grenzwerte eingehalten und der zusammengefasste Index liegt ebenfalls unter 100 %.

Abbildung 5 zeigt alle Parameter, aus denen sich der gesamte Index zusammensetzt. Der zusammengesetzte Index wird hier kpq_{gesamt} genannt und wird aus den untenstehenden Parametern nach der Formel gebildet. Die rote Linie steht für eine Auslastung von 100 % der Grenzwerte. Eine Grenzwertverletzung liegt in dieser Abbildung nicht vor. Abbildung 6 hat die gleichen gemessenen Parameter, aber die Frequenz ist der einzige Wert, der zu hoch ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass der gesamte Index nun über 100 % liegt. Hier zeigt sich der Vorteil der kubischen Mittelwertbildung. Es gibt nur einen einzigen Wert außerhalb der Grenzwerte, und daher liegt der gesamte Index bereits über 100 %. Die Idee dieses Konzepts ist, dass die Benutzer:innen dieses Parameters nur den einzelnen Parameter überwachen. Eine Verletzung der Netzqualität kann nur durch einen einzigen Wert erkannt werden. Treten solche Ereignisse auf, können die Benutzer:innen die zugrundeliegenden Unterparameter analysieren und die Ursache für die Abweichung ermitteln. Aufgrund dieser Tatsache ist dieses vereinfachte Konzept auch für Nichtexpert:innen leicht zu interpretieren [3].

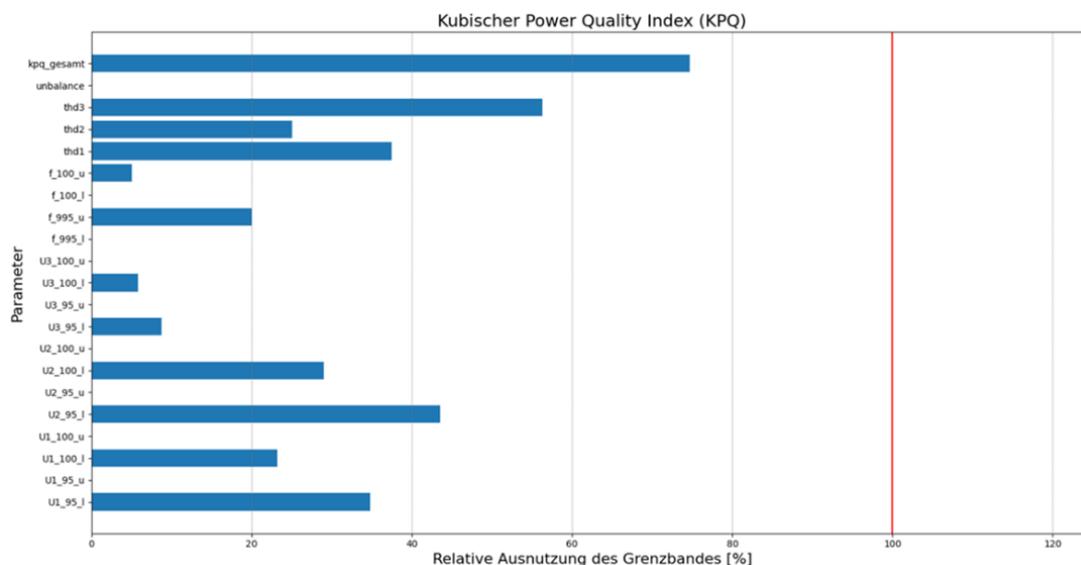


Abbildung 5: Kubischer Power Quality Index innerhalb der Grenzen [vgl. 3]

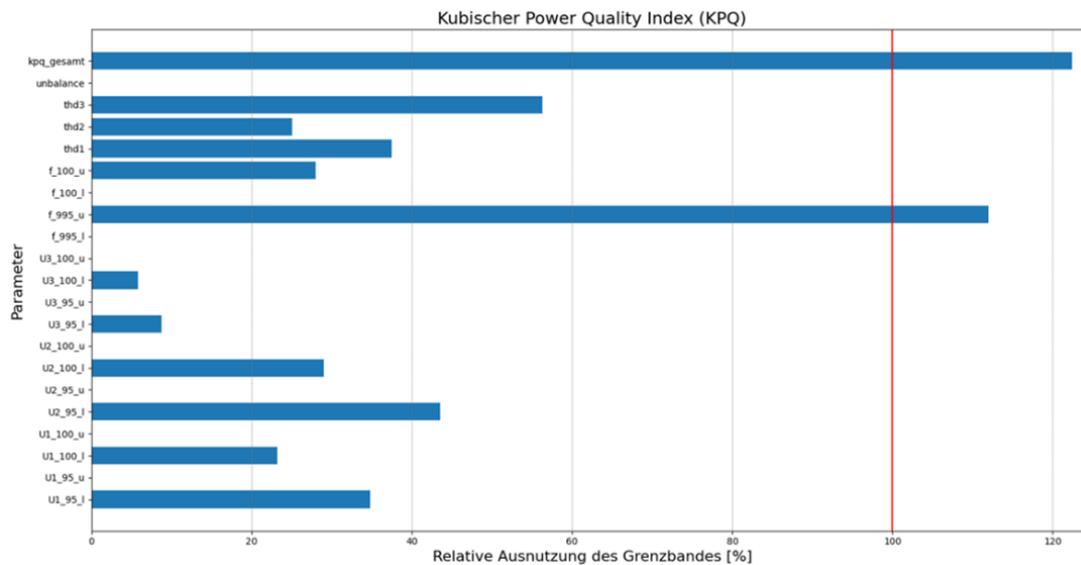


Abbildung 6: Kubischer Power Quality Index außerhalb der Grenzen [vgl. 3]

3 Konzept zur vereinfachten Netzspannungsqualitätsüberwachung

Im vorhergehenden Abschnitt wurden zwei unterschiedliche Konzepte zur vereinfachten Überwachung der Netzqualität vorgestellt. Das auf Ampelfarben basierende Konzept hat den Vorteil, dass es sehr einfach zu verstehen ist und leicht auf Messgeräten implementiert werden kann. Ein Nachteil ist jedoch, dass es für manche Anwendungen zu vereinfacht ist. Der kubische Netzqualitätsindex bezieht sich direkt auf die Norm EN 50160 und zeigt mit einem einzigen Wert, wie gut die Norm eingehalten wird. Ein weiterer Vorteil ist die Langzeitanalyse dieses gesamten Parameters. Nachteilig ist, dass die Werte numerisch sind und Anwender:innen Grundkenntnisse über die Normen benötigen. In diesem Beitrag wird daher ein neues Konzept vorgeschlagen, das eine Kombination der beiden Konzepte darstellt. Der kubische Netzqualitätsindex wird gebildet und dann in ein Farbkonzept aufgeteilt, das auf einer Karte dargestellt werden kann. Auf der Karte gibt es für jedes Messgerät einen Marker, dessen Farbe den aktuellen Netzqualitätsstatus anzeigt. Befinden sich mehrere Messgeräte an einem Standort (z.B. durch mehrere Abzweige einer Trafostation), können die Marker auf der Karte ausgeklappt werden und es wird eine Liste der installierten Messgeräte angezeigt.

In dem vorgeschlagenen Konzept werden die folgenden Farbunterteilungen verwendet:

- Grün: $KPQ < 80\%$
- Orange: $80\% \leq KPQ \leq 100\%$
- Rot: $KPQ > 100\%$

Das beschriebene Konzept zur Visualisierung auf einer Karte ist in Abbildung 7 dargestellt. Das Bild zeigt einen Ausschnitt von Wien. Die grüne Markierung zeigt den Standort von Siemens Österreich und enthält reale Messergebnisse, die mit dem SICAM EGS aufgenommen und ausgewertet wurden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Applikation entwickelt, die den aktuellen KPQ direkt auf dem SICAM EGS analysiert.

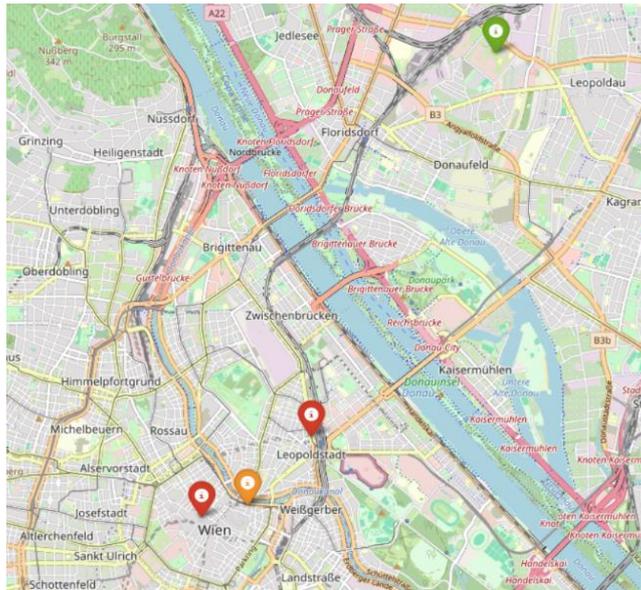


Abbildung 7: Darstellung der Messgeräte auf einer Karte [4]

4 Ergebnisse

Die theoretische Gegenüberstellung beider Messgeräte führte zu dem Ergebnis, dass das kostengünstigere Messgerät SICAM EGS in einigen Punkten dem SICAM Q200 unterlegen ist. In zahlreichen Anwendungsfällen, vor allem wenn ein genereller Netzüberblick gefordert wird, kann jedoch das kostengünstigere Gerät dem Vergleichsgerät vorgezogen werden [4]. Um die Messgenauigkeit der beiden Geräte zu bestimmen, wurden Laboruntersuchungen verschiedener elektrotechnischer Parameter unter der Verwendung eines Omicron CMC 256 plus als Quelle durchgeführt. Abbildung 8 stellt die Messergebnisse für die Phasenspannung U_1 dar. Die Abbildung zeigt die gemessene Abweichung der Spannung in Abhängigkeit der vorgegebenen Messwerte in mV. Die rot strichlierte Linie stellt den Toleranzbereich der genaueren Messklasse A nach DIN EN 61000-4-30 dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass das SICAM Q200 zwar genauere Messergebnisse liefert, jedoch beide Messgeräte mit großem Abstand innerhalb der erlaubten Grenzen liegen. Das Messergebnis für die Phasenspannung U_1 steht in diesem Paper stellvertretend für die weiteren Phasenspannungen U_2 und U_3 . Die Messergebnisse der weiteren Spannungen, auch Außenleiterspannungen, werden in [4] im Detail präsentiert.

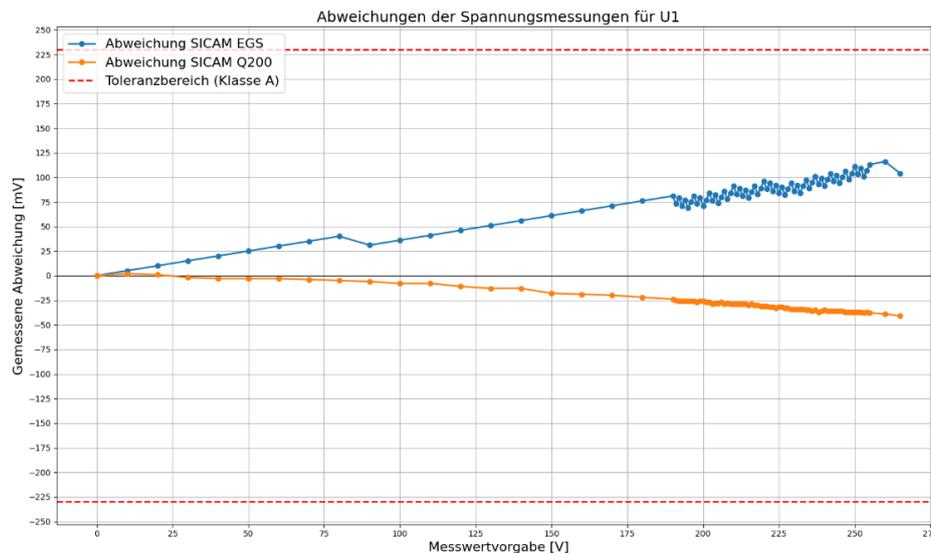


Abbildung 8: Vergleichsmessungen der Phasenspannung U_1 mit SICAM EGS und SICAM Q200 [4]

Das Messergebnis für den Parameter *Netzfrequenz* ist in Abbildung 9 dargestellt. Auch in dieser Grafik wird die Abweichung der gemessenen Werte in Abhängigkeit der vorgegebenen Messwerte veranschaulicht. Wie bei der Spannungsmessung zeigen beide Messgeräte eine sehr präzise Messung sowie einen großen Abstand zum Toleranzbereich der Klasse A nach DIN EN 61000-4-30.

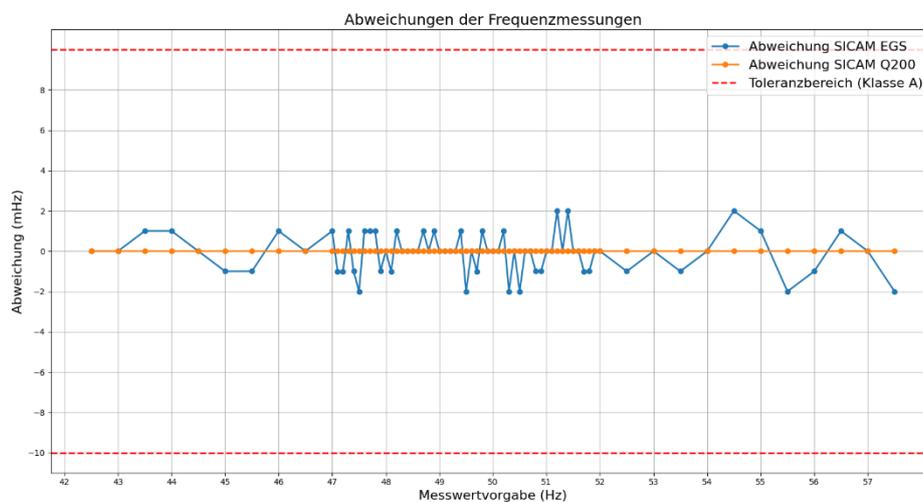


Abbildung 9: Vergleichsmessungen der Frequenz mit SICAM EGS und SICAM Q200 [4]

Bei den Messungen mit Oberschwingungen wurden für den ersten Messpunkt alle nach EN 50160 zulässigen Werte der ersten 25 Harmonischen eingestellt. Für die weiteren Messpunkte wurde jeweils die höchste Harmonische herausgenommen. Somit ergeben sich 25 Messpunkte, wobei der 25. Messpunkt der Grundschwingung entspricht. Das Messergebnis für diese Messung ist für beide Messgeräte in Abbildung 10 dargestellt. An den ersten Messpunkten (Punkte mit mehr Harmonischen) zeigt der SICAM EGS eine höhere Abweichung zum hochgenauen Messgerät SICAM Q200 im Vergleich zu den Messpunkten mit weniger Harmonischen.

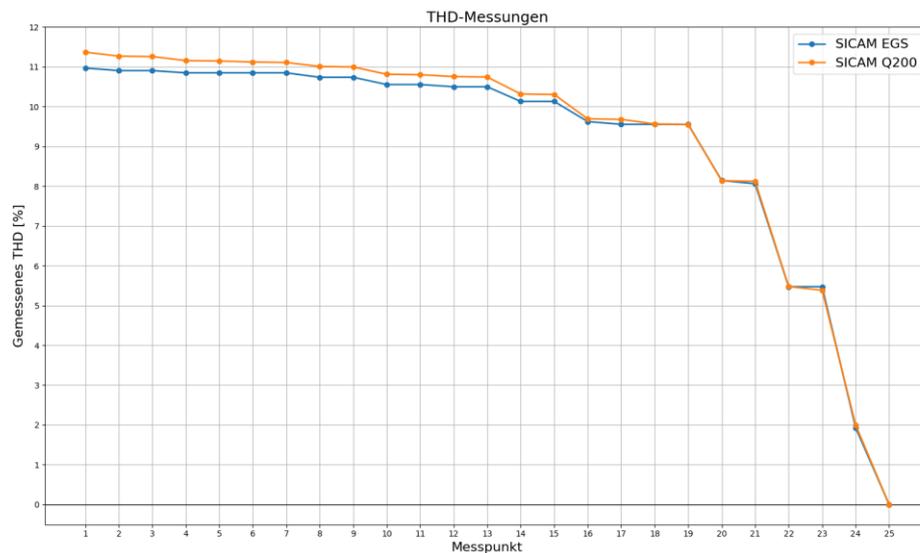


Abbildung 10: Vergleichsmessungen des THD mit SICAM EGS und SICAM Q200 [4]

In der vorliegenden Arbeit wurden für die Durchführung der Strommessungen ausschließlich der SICAM EGS mit Rogowski-Spulen verwendet. Hierbei wurde zwischen dem Laborbetrieb und dem praktischen Betrieb differenziert. Im Rahmen des Laborbetriebs wurden die Rogowski-Spulen zentriert um die stromführenden Leiter montiert. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist in Abbildung 11 dargestellt, wobei eine Abweichung von maximal 62 mA bei einem Messstrom von bis zu 500 A ermittelt wurde.

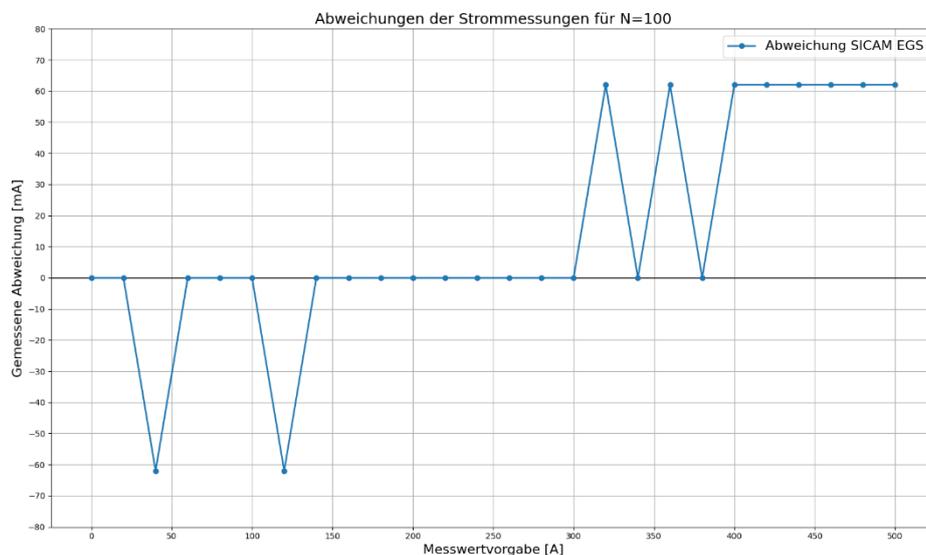


Abbildung 11: Vergleichsmessungen des Stromes im Laborbetrieb mit dem SICAM EGS [4]

Im Vergleich zum Laborbetrieb, bei dem die Rogowski-Spulen zentriert um die stromführenden Leiter montiert werden, kann der praktische Betrieb aufgrund von Montagefehlern eine abweichende Ausrichtung der Rogowski-Spulen aufweisen. Bei einer Stromstärke von 500 A wurde in diesem Betrieb eine Abweichung von 560 mA festgestellt (Abbildung 12). Es wird daher empfohlen, die Rogowski-Spulen bei der Installation des Messgerätes zu zentrieren, um eine signifikant höhere Genauigkeit zu gewährleisten.

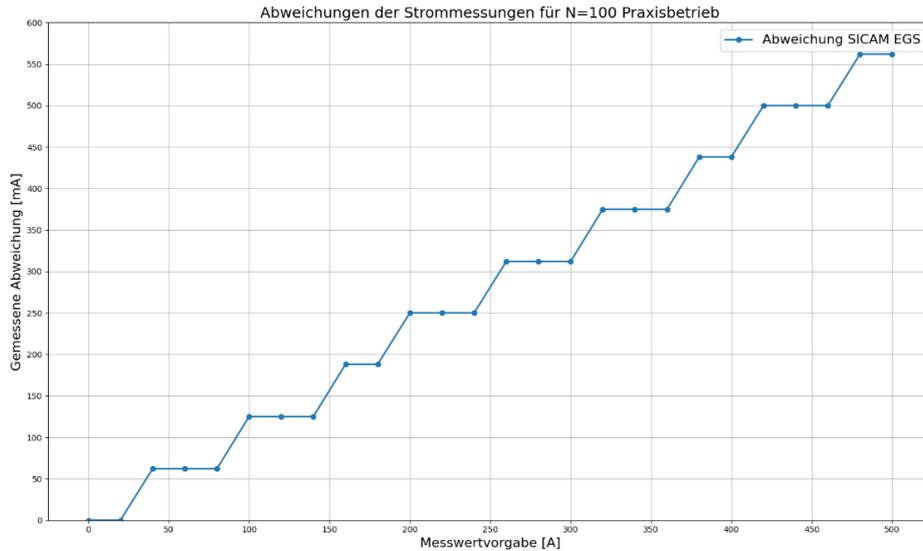


Abbildung 12: Vergleichsmessungen des Stromes im Praxisbetrieb mit dem SICAM EGS [4]

Die Darstellung der Messungen der Scheinleistung, Wirkleistung und Blindleistung mit beiden Vergleichsmessgeräten erfolgt in Abbildung 13. Hinsichtlich der Scheinleistung zeigt der SICAM EGS keine Abweichung zu dem genauen Vergleichsgerät. Eine geringe Abweichung des SICAM EGS zum SICAM Q200 ist hingegen in der Wirkleistungs- und in der Blindleistungsmessung ersichtlich.

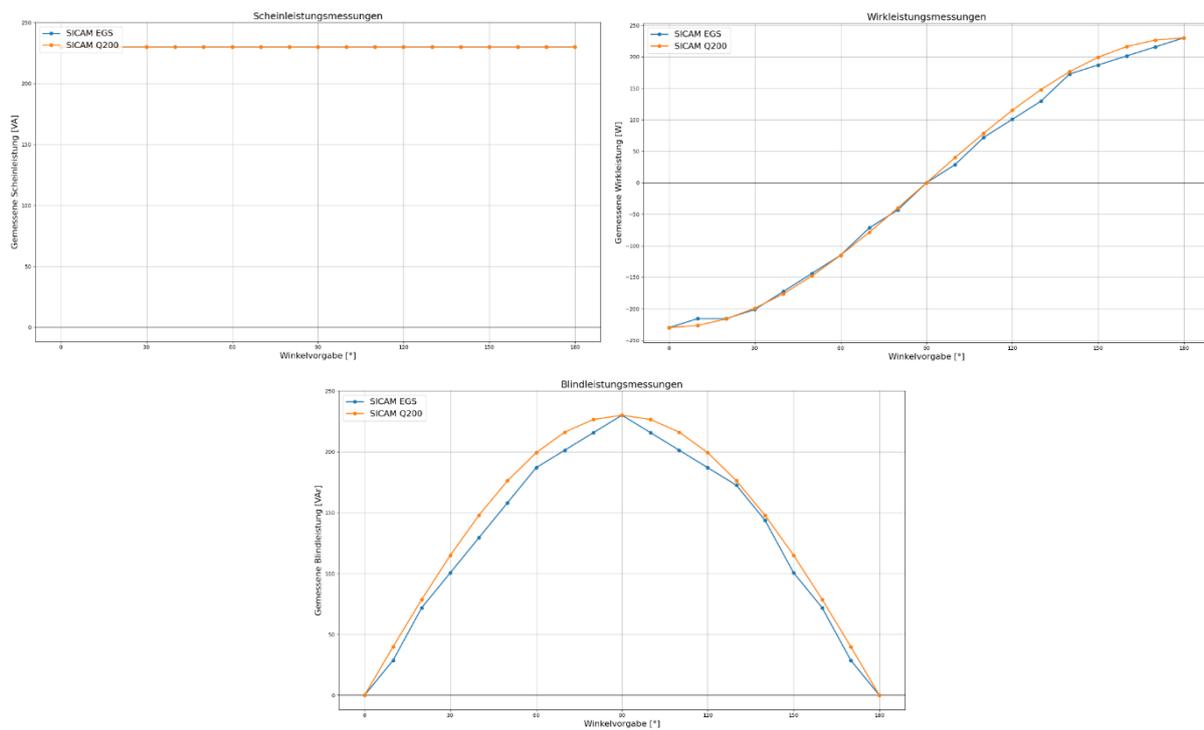


Abbildung 13: Vergleichsmessungen der Scheinleistung, Wirkleistung und Blindleistung mit SICAM EGS und SICAM Q200 [4]

Zur Bestimmung geeigneter Aggregationsintervalle für die Ermittlung des kubischen Power Quality Index wurden in dieser Arbeit verschiedene Intervalle mit einer eigens entwickelten Applikation auf dem SICAM EGS getestet (1s, 3s, 1min, 10min). Dazu wurden verschiedene Standorte mit unterschiedlichen Gegebenheiten verwendet. Die Messungen wurden an einem Haushalt ohne PV-Anlage, einem Haushalt mit PV-Anlage und auf dem Microgrid Campus der Siemens AG Österreich durchgeführt. In Abbildung 14 ist das Messergebnis für ein Aggregationsintervall von einer Sekunde bei einem Haushalt mit PV-Anlage dargestellt. An einem bewölkten Messtag wurde die Messung an einem Haushalt mit PV-Anlage durchgeführt und es konnte festgestellt werden, dass zu dem Zeitpunkt, an dem die Sonne durchkam, die PV-Anlage deutlich mehr Energie erzeugte. Aufgrund des Wechselrichters sind daher eine höhere Spannung und mehr Oberschwingungen zu beobachten, wodurch der KPQ eine deutliche Erhöhung zeigt.

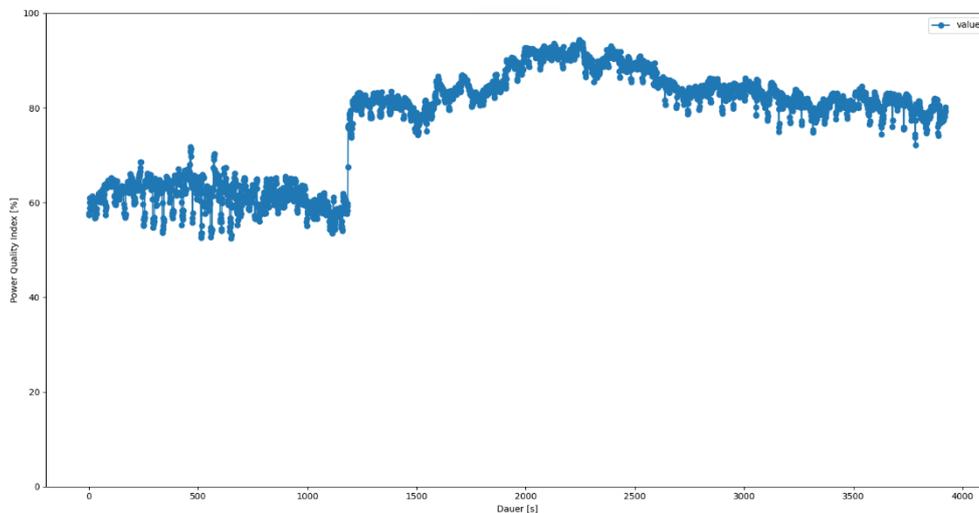


Abbildung 14: KPQ Messung mit Aggregationsintervall 1 s (Haushalt mit PV Anlage) [4]

Direkt im Anschluss an die 1 s-Messung wurde eine Messung mit einem Aggregationsintervall von 10 min durchgeführt. Es zeigt sich, dass das KPQ-Niveau auch mit diesem Intervall dargestellt werden kann.

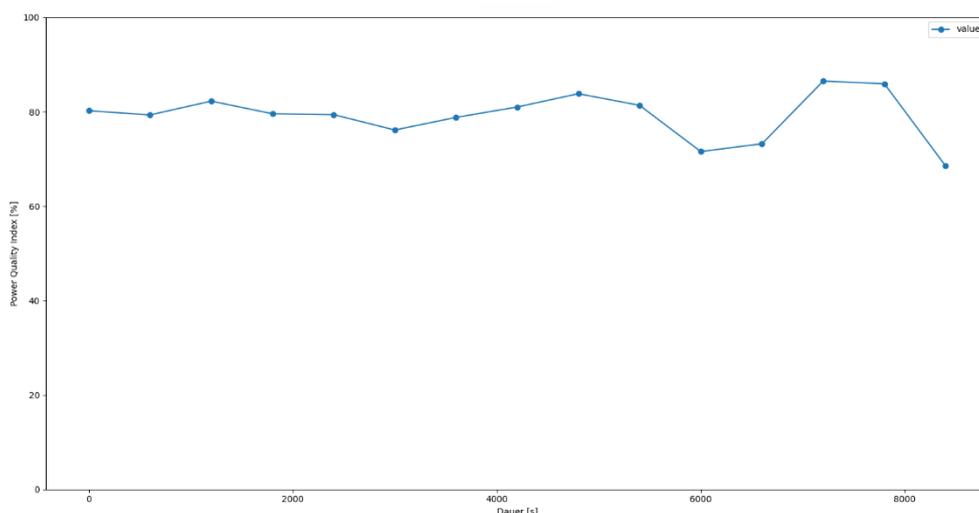


Abbildung 15: KPQ Messung mit Aggregationsintervall 10 min (Haushalt mit PV Anlage) [4]

Ähnliche Ergebnisse haben auch die Messungen mit denselben Aggregationsintervallen am Microgrid Campus der Siemens AG Österreich gebracht (Abbildungen 16 und 17). Im Vergleich zu der vorhergehenden Messung ist ein insgesamt geringerer KPQ zu beobachten. Ein Grund dafür liegt in der besseren Regelung des Netzes an diesem Standort.

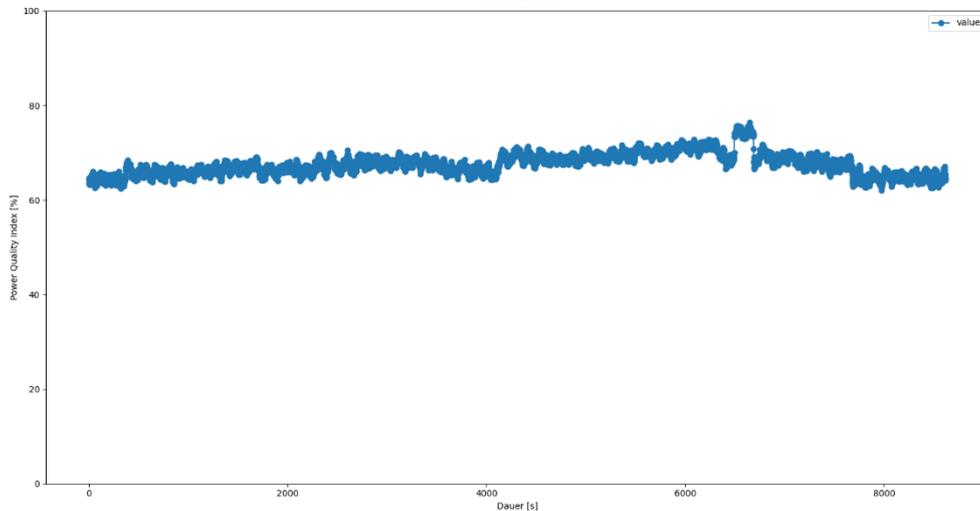


Abbildung 16: KPQ Messung mit Aggregationsintervall 1 s (Siemens Microgrid Campus) [4]

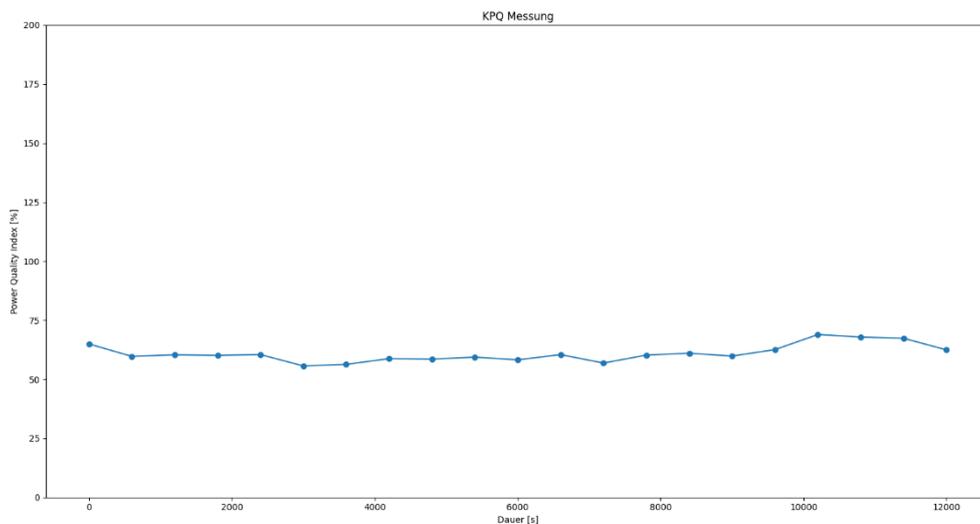


Abbildung 17: KPQ Messung mit Aggregationsintervall 10 min (Siemens Microgrid Campus) [4]

Die Ergebnisse der Messungen mit verschiedenen Aggregationsintervallen sind differenziert zu betrachten. Es kann kein allgemein gültiges Aggregationsintervall für die verschiedensten Messanwendungen angegeben werden. In Industriebetrieben mit sensiblen Maschinen, die eine gute Netzspannungsqualität benötigen und entsprechend schnell regeln können, kann ein geringeres Intervall verwendet werden. Für das elektrische Verteilnetz eignen sich auch größere Aggregationsintervalle, um die Netzspannungsqualität zu überwachen. Auch im Hinblick auf die große Anzahl an Messstandorten in einem elektrischen Verteilnetz und den damit erzeugten Messdaten ist ein größeres Aggregationsintervall zu empfehlen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Ausbau der erneuerbaren Energien spielt eine entscheidende Rolle bei der Energiewende und der Erreichung der Klimaziele, wodurch die Energieversorgungsnetze vor neuen Herausforderungen stehen. In diesem Zusammenhang gewinnt der Begriff der Netzqualität zunehmend an Bedeutung. Der vorliegende Beitrag erläutert daher die geltenden Normen und Parameter der Netzqualität und skizziert die aktuellen Herausforderungen im Netzbetrieb. Zu diesem Zweck wurden zwei Messgeräte einer eingehenden Analyse unterzogen, um die Effizienz ihrer Anwendung für die Überwachung der Netzqualität zu ermitteln. Der Vergleich der beiden Messgeräte in der Theorie und in den Messungen ergab, dass das günstigere Modell, der SICAM EGS, dem SICAM Q200 in einigen Punkten unterlegen ist. Bei der Messung von Netzspannungen und Netzfrequenzen zeigte sich jedoch, dass das kostengünstigere Messgerät eine vergleichbare Messgenauigkeit aufweist. In vielen Anwendungsbereichen kann daher das günstigere Gerät dem Vergleichsgerät vorgezogen werden.

Im Rahmen der Konzeptbildung wurden zwei Konzepte zur effizienten Überwachung der Netzspannungsqualität analysiert. Die Analyse ergab, dass beide Konzepte gewisse Vor- und Nachteile aufweisen. Daraufhin wurde ein Konzept mit kubischer Mittelung der Parameter der EN 51060 zur näheren Untersuchung herangezogen. Bei anschließenden Messungen wurden verschiedene Aggregationsintervalle zur Bestimmung der Messgrößen untersucht. Die Untersuchung ergab, dass unterschiedliche Aggregationsintervalle für verschiedene Anwendungen besser geeignet sind. Für die Entwicklung eines Gesamtkonzeptes wurde diese Methodik um eine einfache Visualisierungsmöglichkeit für ein gesamtes Energieversorgungsnetz erweitert. Dazu wurde eine Methode entwickelt, die die Ergebnisse des kubischen Netzqualitätsparameters übersichtlich visualisiert. Eine Verbindung zum zweiten betrachteten Konzept wurde hergestellt, indem die Ergebnisse des kubischen Netzqualitätsindex auf einer Karte mit farbigen Indikatoren dargestellt werden. Jeder Messpunkt bzw. jedes Messgerät erhält dabei einen eigenen Eintrag in der Karte.

In zukünftigen Forschungsarbeiten könnte eine Erweiterung der Analyseanwendung für weitere Netzparameter, die mit dem SICAM EGS nicht erstellt werden konnten, von Interesse sein. Eine Erweiterung um statistische Parameter, die Zeitpunkte und Häufigkeiten von Ereignissen berücksichtigen, könnte Gegenstand zukünftiger Forschung sein. Die Integration von künstlicher Intelligenz, beispielsweise in Form einer Kooperation mit [7], die sich mit der optimalen Platzierung von Netzinfrastruktur in Niederspannungsnetzen beschäftigt, könnte zu einer weiteren Verbesserung des Gesamtkonzeptes beitragen.

Danksagung

Der Hauptautor bedankt sich an dieser Stelle bei Herrn Peter Stern und Herrn Jaroslav Kussyk von Siemens Smart Infrastructure für ihre Unterstützung und die Möglichkeit, die Ergebnisse in diesem Papier zu präsentieren.

Das Projekt INFRADAPT [7] wird vom Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Energieforschung 2022“ durchgeführt.

Literatur

- [1] Tauschek, M. Baumann, R. Bergmayer, G. Bitzan, L. Fiedler, M. Liesinger, M. Radauer, W. Schaffer, R. Schmaranz, K. Schüller et al. (2018). Digitalisierung der Netzführung im Verteilernetz–Netzführung 2025. Österreichs Energie.
- [2] Schmaranz, L. Fiedler, R. Bergmayer, M. Hochwarter, B. Frittm-Lafer, H. Buzanich, W. Schaffer, C. Ammer, T.-S. T. AG, R. Schlögl et al. (2020). Zukünftige Herausforderungen im Verteilernetzbetrieb. 16. Symposium Energieinnovation, Graz.
- [3] Schoeffer, W. (2018). Beitrag zur Definition eines Power Quality Index. 15. Symposium Energie-innovation, Graz.
- [4] Arthofer, S. (2024). Analyse und Konzept zur Überwachung der Spannungsqualität in Verteilnetzen [Diplomarbeit, Technische Universität Wien]. repositUM.
- [5] Deutsches Institut für Normung. (2023). Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods (DIN EN 61000-4-30:2023). Beuth Verlag.
- [6] Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung. (2023). Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks (EN 50160:2023). CENELEC.
- [7] TU Wien. (2024). Climate change resilient energy infrastructure through AI-based adaptation (INFRADAPT). <https://project-infradapt.eu>
- [8] M. H. Bollen. (2003). What is power quality? Electric power systems research, vol. 66, no. 1, pp. 5–14.
- [9] V. Lackovic. (o.J.). Power Quality Measurements - Essential Theory. Continuing Education and Development. Letzter Zugriff: 07.02.2025. [Online] <https://www.cedengineering.com/userfiles/Power%20Quality%20Measurements%20-%20Essential%20Theory-R1.pdf>
- [10] A. F. Zobaa, R. Bansal und M. Manana. (2011). Power quality: Monitoring, analysis and enhancement. BoD–Books on Demand.
- [11] J. Kilter, S. Elphick, J. Meyer, und J. V. Milanovic. (2014). Guidelines for power quality monitoring-results from cigre/cired jwg c4. 112. 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE. pp. 703–707.
- [12] Siemens AG. (2025). Digital Asset Management: SICAM EGS. Letzter Zugriff: 15.02.2024. [Online]. Lizenziert unter: <https://assets.new.siemens.com/content/siemens/assets/ui/en/search.html#/asset/sid:615fd1e9-1cbb-425e-b887-7e7ed614388>
- [13] Siemens AG. (2024). Digital Asset Management: SICAM Q200. Letzter Zugriff: 16.12.2024. [Online]. Lizenziert unter: <https://assets.new.siemens.com/content/siemens/assets/ui/en/search.html#/asset/sid:12815cee-c32a-4adc-ab99-865843d746ee>
- [14] Ignatova, D. Villard, und J.-M. Hypolite. (2015). Simple indicators for an effective power quality monitoring and analysis. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). IEEE. pp. 1104–1108.
- [15] R. S. Kumar, I. G. C. Raj, S. Saravanan, P. Leninpugalhanthi, und P. Pandiyan. (2021). Impact of powerquality issues in residential systems. Power Quality in Modern Power Systems. Elsevier. pp. 163–191